

РАЗРАБОТКА СОСТАВА КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ПЛИТ НА ОСНОВЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ МАССЫ

В. Н. Ермолин*, В. А. Острякова, М. А. Баяндин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: ermolinvn@sibsau.ru

Древесностружечные плиты (ДСП) широко используются в производстве мебели и других изделий. Существенным недостатком этих плит является то, что в процессе эксплуатации происходит эмиссия формальдегида, обусловленная наличием формальдегидных смол. В данной работе приводятся результаты исследований по разработке состава композиции для получения стружечных плит, по свойствам аналогичным ДСП, но без использования синтетических связующих.

Предложено получать плиты, состоящие из древесных частиц (наполнитель) и активированной древесной массы (матрица). В исследованиях в качестве наполнителя использовалась стружка, изготовленная на безунковой дробилке. Древесную массу получали путем обработки древесных опилок на гидродинамическом диспергаторе роторного типа. Для получения зависимостей влияния состава композиции (доля и фракционный состав наполнителя, плотность плит) на механические свойства (прочность при статическом изгибе, прочность на разрыв перпендикулярно пласти) и разбухание плит был проведен многофакторный эксперимент. В результате исследований установлено, что показатели прочности плит возрастают при уменьшении размера частиц наполнителя, увеличении плотности плит и уменьшении доли наполнителя в композиции. Разбухание плит по толщине снижается при увеличении размера частиц наполнителя, уменьшении его доли в композиции и увеличении плотности плит. Используя полученные закономерности влияния состава композиции на ее свойства была проведена поликритериальная оптимизация. В результате установлен оптимальный состав композиции: доля наполнителя – 70 %, номер фракции стружки – 3, плотность плит – 700 кг/м³. Такой состав композиции позволяет получить плиты, которые по всем свойствам соответствуют требованиям, предъявляемым к ДСП. Но при этом полученные плиты имеют класс эмиссии формальдегида E 0. Они могут использоваться без каких-либо ограничений.

Ключевые слова: композиция, связующее, водородные связи, размер частиц, доля наполнителя, матрица.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 6, P. 530–535

DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION OF THE COMPOSITION FOR THE PRODUCTION OF WOOD SLABS BASED ON THE MECHANIZED MASS

V. N. Ermolin*, V. A. Ostryakova, M. A. Bayandin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ermolinvn@sibsau.ru

Particleboards made of wood shavings (PWS) are widely used in furniture and other products manufacturing. The significant disadvantage of these boards is the emission of formaldehyde during use, caused by the presence of formaldehyde resins. This work presents the results of research on the development of a composition for obtaining shavings boards with properties similar to PWS but without the use of synthetic binders.

The proposed boards consist of wood particles (filler) and activated wood mass (matrix). In the research, shavings were used as filler, manufactured using a milling cutter. The wood mass was obtained by treating wood sawdust in a rotary-type hydrodynamic disperser. A multifactor experiment was conducted to determine the dependence of the composition (filler fraction and size, board density) on the mechanical properties (strength under static bending, perpendicular tensile strength) and board swelling. As a result, it was established that the strength indicators of the boards increase with a decrease in the size of the filler particles, an increase in board density, and a decrease in the filler fraction in the composition. Swelling along the thickness of the board decreases with an increase in the filler particle size, a decrease in its fraction in the composition, and an increase in board density.

Using the obtained patterns of the composition's influence on its properties, a multicriteria optimization was carried out. As a result, the optimal composition was established: 70 % filler fraction, shavings fraction number 3, board density 700 kg/m³. This composition allows obtaining boards that meet all the requirements for PWS while having formaldehyde emission class E0. They can be used without any restrictions.

Keywords: composition, binder, hydrogen bonds, particle size, filler fraction, matrix.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для производства мебели и отделочных материалов наиболее широко используются древесностружечные плиты (ДСтП). Это во многом обусловлено сравнительно высокими физико-механическими свойствами, низкими требованиями к древесному сырью и возможностью получения плит требуемой толщины. ДСтП представляет собой композит, состоящий из древесных стружек, связанных между собой точечными контактами с помощью адгезива [1]. Формирование структуры такого композита осуществляется путем пьезотермического воздействия на стружечно-клеевую массу. В качестве связующего используются термореактивные смолы на основе формальдегида, такие как карбаминоформальдегидная (КФС) и в меньшей степени, фенолформальдегидная (ФФС) смолы [2]. Следствием этого является эмиссия свободного формальдегида из ДСтП [27; 30]. В работах [3–5] установлено, что основным источником формальдегида, внутри помещений, являются древесные плиты, при этом доказана его канцерогенность [5]. За последние годы было предложено много подходов к сокращению эмиссии формальдегида из древесных плит. Основным направлением является частичное замещение в составе связующих формальдегидных смол физически активными наполнителями, в качестве которых использовалась химически модифицированная древесная масса, отходы целлюлозно-бумажного производства, в том числе дисперсии лигнина [6; 7], древесные экстракты [8]. Известны попытки перехода на альтернативные клеи, такие как акриловые смолы [9] эпоксицированные растительные масла [10; 29], клеи на основе сои и полимерный дифенилметандиизоцианат (pMDI) [11; 28]. Но данные решения не позволяют полностью отказаться от химических реагентов и значительно снизить эмиссию токсичных веществ из стружечных плит. Кроме того, точечные адгезионные контакты не позволяют обеспечить целостность структуры стружечной плиты при длительном контакте с водой, в результате чего она распадается на отдельные фрагменты.

Вызывает интерес другой подход к получению композитов, в котором прочность материала обеспечивается не за счет большой энергии адгезионного взаимодействия при ограниченной площади контакта (точечной), а при меньшей энергии адгезионного взаимодействия, но большей площади контакта матрицы и наполнителя. Примером таких композитов являются стружечные плиты, в которых связующим компонентом является 3% водная суспензия наноцеллюлозы [12; 13]. Доля такого связующего должна быть не менее 15 % в пересчете на абсолютно сухое вещество [14; 15]. По мнению этих авторов, формирование структуры таких стружечных плит обусловлено образованием водородных связей между наполнителем и матрицей в процессе высыхания в горячем прессе. При этом наноцеллюлозные фибриллы формируют трехмерную структуру, за счет образования водородных связей, между собой и с древесной стружкой [16]. Это решает проблему эмиссии токсичных веществ из плит, но не позволяет получать их толщиной более 5 мм. Поэтому их нельзя использо-

вать вместо классических ДСтП в производстве мебели и других изделий. Кроме того возникают проблемы связанные с низкой стабильностью свойств такой матрицы, обусловленные процессами флокуляции фибрилл наноцеллюлозы в растворах, что предопределяет неравномерность распределения контактов с древесными частицами при формировании структуры плит. Необходимо также отметить высокую стоимость такого связующего.

Одним из перспективных направлений получения экологически безопасных плит, по свойствам аналогичным ДСтП, является создание композита из древесной стружки (наполнитель) и древесной массы (матрица), полученной путем механоактивации опилок гидродинамическим способом. Такая масса, представляет собой полидисперсную систему, имеющую развитую удельную поверхность, которая в три раза больше, чем у исходной древесины [17]. Как показали предварительные исследования [18], горячее прессование композита, состоящего из игольчатой стружки и активированной древесной массы в соотношении 1:1, позволяет получить плиты, не уступающие по свойствам ранее отмеченным плитам с использованием наноцеллюлозы. Это указывает на возможность использование такой древесной массы в качестве матрицы при получении древесных композитов.

Целью данной работы является разработка состава композиции для получения экологически безопасных древесных плит по свойствам соответствующим требованиям, предъявляемым ДСтП (по толщине и прочности), у которых матрицей является механоактивированная древесная масса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В большинстве случаев наполнитель для стружечных плит получают резанием древесины, при этом получают стружку игольчатой ли плоской формы с минимальной шероховатостью. Это дает возможность обеспечить сыпучесть наполнителя при транспортировке и минимизировать впитываемость адгезива в древесину при осмолении, что позволяет создать условия для формирования точечных контактов. Именно такой наполнитель наиболее желателен в производстве ДСтП. Но специфические особенности компонентов разрабатываемой композиции предъявляют другие требования к наполнителю. В частности, это относится к удельной поверхности древесных частиц. В ряде работ [19; 26] установлено, что при измельчении древесины влажностью более 50 % методом поперечного деформирования (сжатия) в бегунковых, или шаровых мельницах происходит ее разрыв по срединной пластинке [20]. Такой способ измельчения позволяет получать разволокненные древесные частицы с большей удельной поверхностью в сравнении с древесной стружкой для ДСтП, без существенного изменения их длины [21]. По соотношению размеров и способу получения эти древесные частицы представляют собой дробленку, подобную используемой в производстве арболита [22; 23]. Но по форме, согласно принятой классификации [19], ее можно отнести к игольчатой стружке. Исследования с ис-

пользованием светового микроскопа показали, что такие древесные частицы не имеют строгой геометрической формы. Наблюдается частичное разрушение по срединной пластинке клеточной стенки, особенно в зоне ранней древесины.

Учитывая вышесказанное, при исследованиях, в качестве наполнителя использовалась стружка, полученная из хвойной древесины на бегунковой дробилке «Vecorlan». Геометрические характеристики данного наполнителя оценивали по следующим показателям: средний размер по толщине, по длине и ширине, а также придельные измерения (максимум и минимум) [25]. Данные замеров геометрических параметров стружки обрабатывали методом вариационной статистики, результаты которой приведены в табл. 1.

В качестве матрицы использовались активированная древесная масса, которая изготавливалась, путем обработки в течение 15 минут отходов лесопиления (хвойных опилок) в гидродинамическом диспергаторе с гидромодулем 1:10, согласно методики подробно описанной в работе [24]. Смешивание древесной матрицы с наполнителем осуществлялось в смесителе активаторного типа. После чего полученную смесь загружали в пресс-форму размером 250×250 мм и производили подпрессовку в холодном прессе при давлении $P = 2,5$ МПа в течение $\tau = 5$ мин. Уплотненная композиция помещалась в пресс горячего прессования, где согласно выбранному режиму прессовалась до состояния готовой плиты. В результате получали однослойные плиты толщиной 15 мм разной плотности.

Для установления влияния состава композиции на свойства плит был проведен трех факторный эксперимент согласно плану $V = 3$. В качестве варьируемых факторов приняты: плотность плит, доля наполнителя в композиции, фракционный состав наполнителя. Переменные факторы и уровни их варьирования приведены в табл. 2. Выходными параметрами эксперимента являлись: предел прочности при статическом изгибе (Y_1), предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти (Y_2), разбухание плит по толщине (Y_3).

Таблица 1
Геометрические характеристика древесного наполнителя

Показатели	Номер фракции (диаметр сита, мм)										
	10	7	5	3	2	1,25	1	0,5	0,25	дно	
Фракционный состав, %	1,9	12,5	22,7	36,7	1,9	10,1	1,2	5,7	3,1	4,2	
Средние размеры, мм:											
Длина	23,3	16,7	14,2	12,5	11,5	9,4	3,1	1,3	0,6	0,2	
Ширина	9,5	7,3	4,6	2	1,6	0,9	0,3	0,3	0,2	0,08	
Толщина	5,7	4	5,52	1,05	0,93	0,67	0,31	0,37	0,27	0,08	
Средние размеры исследуемой партии наполнителя, мм				Длина l_{cp} , мм			Ширина b_{cp} , мм		Толщина S_{cp} , мм		
				9,28			2,6		1,9		

Таблица 2
Переменные факторы и уровни их варьирования

Наименование факторов	Обозначения	Уровни варьирования		
		-1	0	+1
Плотность плит, ρ , кг/м ³	X_1	650	750	850
Доля наполнителя в композиции, V , %	X_2	30	50	70
Номер фракции, S	X_3	3	5	7

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке экспериментальных данных были получены следующие результаты.

Зависимость предела прочности плит при статическом изгибе от состава композиции представлены в виде уравнения регрессии в нормализованных значениях факторов (1) и поверхностей отклика в натуральных значениях факторов на рис. 1.

$$Y_1 = 10,75 + 0,89 \cdot X_1 - 1,36 \cdot X_2 - 2,61 \cdot X_3 - 0,99 \cdot X_2^2. \quad (1)$$

Наиболее существенное влияние на прочность при статическом изгибе оказывает размер частиц наполнителя. В исследуемом диапазоне уменьшение размера частиц приводит к увеличению прочности плиты. Как известно [1] у ДСтП противоположная зависимость, которая легко объяснима на основании общих закономерностей механики композитов. Это говорит о том, что у разрабатываемого материала другой механизм формирования этого показателя предела прочности при статическом изгибе. Можно предположить, что в данном случае большое влияние оказывает площадь контакта матрицы и наполнителя. С уменьшением размера частиц наполнителя площадь возрастает, что объясняет полученную закономерность. Также существенно на прочность плит влияет соотношение наполнителя и матрицы. При увеличении доли наполнителя прочность снижается, а при увеличении плотности возрастает.

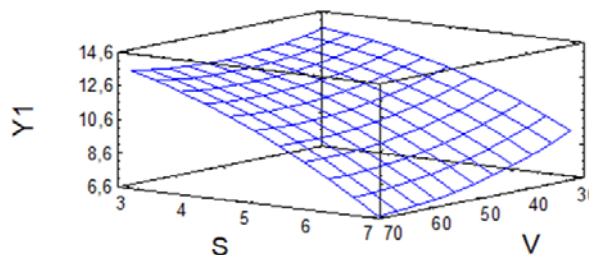


Рис. 1. Зависимость предела прочности плит при статическом изгибе от состава композиции

Полученные закономерности влияния параметров композиции на предел прочности плит при растяжении перпендикулярно пласти представлены уравнением (2), рис. 2.

$$Y_2 = 0,2475 + 0,022 \cdot X_1 - 0,045 \cdot X_2 - 0,11 \cdot X_3 - 0,0475 \cdot X_3^2, \quad (2)$$

Как видно из полученных результатов характер влияния параметров композиции на данный показатель прочности такой же, как и на прочность при статическом изгибе. С уменьшением размера частиц и плотности происходит увеличение прочности плит. При увеличении доли наполнителя в составе композиции прочность снижается.

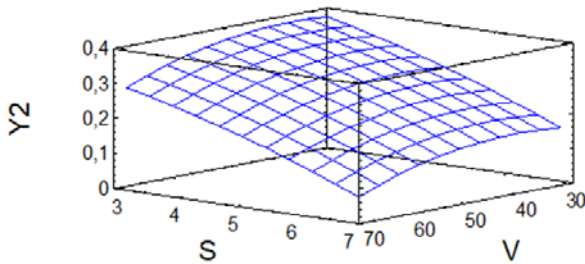


Рис. 2. Зависимость предела прочности плит при растяжении перпендикулярно пласти от состава композиции

Зависимость величины разбухания плит по толщине от состава композиции представлены уравнением (3), рис. 3.

$$Y_3 = 24,05 - 2,22 \cdot X_1 + 3,34 \cdot X_2 + 3,54 \cdot X_3 + 3,75 \cdot X_1^2, \quad (3)$$

Наиболее существенное влияние на разбухание плит по толщине оказывает размер частиц наполнителя. Увеличение размеров наполнителя приводит к возрастанию разбухания. Также к возрастанию разбухания приводит увеличение доли наполнителя в композиции. При этом увеличение плотности плит снижает величину их разбухания.

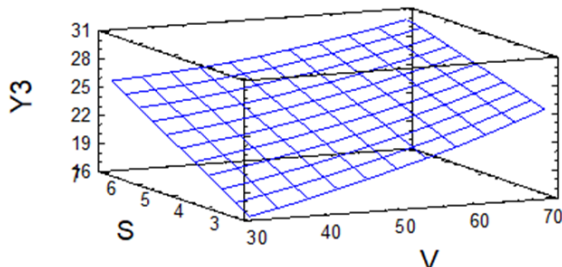


Рис. 3. Зависимость разбухания плиты по толщине от состава композиции

Следует отметить следующую особенность исследуемых плит. При вымачивании в воде эти плиты разбухают, но не распадаются на отдельные фрагменты, что наблюдается у ДСтП. При высушивании толщина плит уменьшается, но не возвращается к исходным

размерам. Остаточная прочность на растяжение перпендикулярно пласти составляет порядка 25 % от исходной.

Полученные закономерности влияния состава композиции на свойства плит позволили провести оптимизацию. При этом исходили из того, что обязательным условием является получение материала, который, по основным свойствам соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 10632–2014 к ДСтП. А именно: плотность 650..800 кг/м³; предел прочности при изгибе $\sigma_{изг} = 10$ МПа; предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти $\sigma_{раст} = 0,24$ МПа; разбухание по толщине за 24 ч $V = 30$ % [31]. Кроме того, ставилась задача снижения себестоимости плит. Она зависит от плотности. А также от доли активированной массы в композиции, так как ее себестоимость из-за энергозатрат на гидродинамическую обработку выше, чем у наполнителя.

Для определения оптимального состава древесной композиции была проведена поликритериальная оптимизация методом Ньютона при помощи универсального математического процессора MathCAD. В качестве целевой функции был выбран предел прочности при статическом изгибе при соблюдении следующих ограничений: плотность материала 700 кг/м³; доля наполнителя в 70 %. В результате решения поставленной задачи были определены оптимальные значения варьируемых переменных для состава композиции: – плотность 700 кг/м³; доля наполнителя 70 %; номер фракции наполнителя 3. При этом выходные параметры принимают следующие значения: $\sigma_{изг} = 12,9$ МПа; $\sigma_{раст} = 0,24$ МПа; $V = 28$ %.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали, возможность получения древесных плит, состоящих из стружки и активированной древесной массы (матрицы) аналогичные по свойствам ДСтП.

2. Формирование структуры древесной композиции без использования синтетических связующих предопределяет особые требования к наполнителю по его удельной поверхности. Таким требованиям соответствует древесная стружка полученная на бегунковых дробилках, принцип работы которых основан на методе раздавливания влажной щепы.

3. Свойства плит зависят от состава композиции. Показатели прочности возрастают при уменьшении размера частиц наполнителя и уменьшении его доли в композиции, а также при увеличении плотности плит. Разбухание плит по толщине снижается при уменьшении размеров частиц наполнителя и их доли в композиции, а также с увеличением плотности.

4. Для плит, состоящих из композиции, в которой 70 % наполнителя фракции № 3 при плотности 700 кг/м³ получены следующие показатели: предел прочности при статическом изгибе – 12,9 МПа; предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти – 0,24 МПа; разбухание по толщине – 28 %. Все эти показатели удовлетворяют требованиям, предъявляемым ГОСТ 10632-2014 к ДСтП. При этом полученные плиты имеют класс эмиссии формальдегида Е 0.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Леонович А. А. Технология древесных плит: прогрессивные решения. 2005.
2. Jambreković V. et al. Mogućnost proizvodnje kompozitnih materijala od usitnjenog drva u Republici Hrvatskoj // *Drvna industrija*. 2006. Т. 57, № 4. С. 183–191.
3. Johannes Karl Fink, Chapter 4 – Phenol/Formaldehyde Resins, Editor(s): Johannes Karl Fink, In *Plastics Design Library, Reactive Polymers Fundamentals and Applications (Second Edition)*, William Andrew Publishing, 2013. P. 155–177. ISBN 978-1-45573-149-7.
4. Дедкова Л. А., Лисецкая Л. Г. Эмиссия формальдегида в воздух закрытых помещений // *Acta Biomedica Scientifica*. 2011. № 3-2. С. 76–79.
5. https://zctc.ru/sections/fenol_i_formaldegid_v_pomesheniyah.
6. Antonović A. et al. Influence of urea-formaldehyde resin modification with liquefied wood on particleboard properties // *Drvna industrija*. 2010. Т. 61, № 1. С. 5–14.
7. Каримов О. Х. и др. Развитие химии и технологии биополимера лигнина // *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2020. № 1. С. 25–39.
8. Prasittisopin L., Li K. A new method of making particleboard with a formaldehyde-free soy-based adhesive // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Т. 41, № 10. С. 1447–1453.
9. Gross G. G. Biosynthesis of lignin and related monomers // *The Structure, Biosynthesis, and Degradation of Wood*. 1977. С. 141–184.
10. Sivasubramanian S., Schmidt D. F., Reynaud E. Novel bio-based thermoset resins from epoxidized vegetable oils for structural applications // *68th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*. 2010. С. 1673–1677.
11. Preechatiwong W., Yingprasert W., Kyokong B. Effects of phenol-formaldehyde/isocyanate hybrid adhesives on properties of oriented strand lumber (OSL) from rubberwood waste // *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*. 2007. Т. 29, № 5. С. 1367–1375.
12. Зарубина А. Н. и др. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор // *Лесной вестник / Forestry bulletin*. 2019. Т. 23, № 5. С. 116–125.
13. Рахимова Б. У. и др. Наноцеллюлоза: характеристика, модификация и биосовместимость // *Новости науки Казахстана*. 2019. № 4 (142). С. 72.
14. Amini E. et al. Utilization of cellulose nanofibrils as a binder for particleboard manufacture // *BioResources*. 2017. Т. 12, № 2. С. 4093–4110.
15. Применение наноцеллюлозы в процессах склеивания и модифицирования древесины / В. А. Шамаев, Н. С. Никулина, С. А. Константинова и др. // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*. 2012. № 8(91). С. 107–110.
16. Gardner D., Tajvidi M. Hydrogen bonding in wood-based materials: an update // *Wood and Fiber Science*. 2016. Т. 48, № 4. С. 234–244.
17. Ермолин В. Н. и др. Водостойкость древесных плит, получаемых без использования связующих веществ // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020. № 3 (375). С. 151–158.
18. Обливин А. Н., Лопатников М. В. Нанотехнологии и наноматериалы в лесном комплексе : монография. М. : МГУЛ, 2011. 221 с.
19. Пучков Б. В. Измельчение сырья для древесных плит. М. : Лесн. пром-сть, 1980. 117 с.
20. Александрова А. Н., Соловьева Т. В. Интенсификация дефибраторного размола щепы. 2013.
21. Модлин Б. Д., Отлев И. А. Производство древесностружечных плит. М. : Высш. школа, 1977.
22. ГОСТ 19222–84. Арболит и изделия из него. Общие технические условия.
23. ГОСТ Р 54854–2011. Бетоны легкие на органических заполнителях растительного происхождения. Технические условия.
24. Ермолин В. Н. и др. Разработка режима гидродинамической активации древесных частиц с целью получения плит без связующих веществ // *Хвойные бореальной зоны*. 2017. Т. 35, № 3-4. С. 79–83.
25. Демидов Ю. М. Измельчение древесины для производства древесностружечных плит // *Лесная промышленность*. 1974. С. 100–105.
26. Gravelsins R. J. Studies of grinding of wood and bark-wood mixtures with the Szego mill : дис. 1999.
27. Войт В. Б., Хусаинов Д. Ф. Свойства ДСТП с точки зрения реокинетики отверждения карбамидоформальдегидной смолы в процессе ее старения // *Технология древесных плит и пластиков: межвузовский сборник*. 1997. С. 76–83.
28. Metzger M. T. *Naturnahe Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis zur Herstellung von Holzwerkstoffen*. München: Technischen Universität München, 2007. 159 s.
29. Roffael E., Dix B., Schneider T. Zur Verwendung von Tanninen als Bindemittel in der Holzwerkstoffindustrie // *Tagungsband "Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen"*. Erfurt: WKI, 2001. S. 15–22.
30. Мальцев В. В. Технологии детоксикации карбамидоформальдегидных смол (КФС) и древесно-плитных материалов на их основе [Электронный ресурс] // Тезисы доклада на 12-м Международном форуме «Высокие технологии XXI века». 2011. URL: <http://www.ecrushim.ru/articles/pg171.php> (дата обращения: 24.09.2017).
31. ГОСТ 10632–2014. Плиты древесно-стружечные. Технические условия. Введ. 01.07.2015. М. : Стандартинформ, 2014. 16 с. (Национальный стандарт Российской Федерации).

REFERENCES

1. Leonovich A. A. Technology of wood boards: progressive solutions. 2005.
2. Jambreković V. et al. Mogućnost proizvodnje kompozitnih materijala od usitnjenog drva u Republici Hrvatskoj // *Drvna industrija*. 2006. Т. 57, № 4. С. 183–191.
3. Johannes Karl Fink, Chapter 4 – Phenol/Formaldehyde Resins, Editor(s): Johannes Karl Fink, In *Plastics Design Library, Reactive Polymers Fundamentals and Applications (Second Edition)*, William Andrew Publishing, 2013. P. 155–177. ISBN 978-1-45573-149-7.

4. Dedkova L. A., Lisetskaya L. G. Formaldehyde emission into indoor air // *Acta Biomedica Scientifica*. 2011. № 3-2. Pp. 76–79.
5. https://zctc.ru/sections/fenol_i_formaldegid_v_po_mesheniyah.
6. Antonović A. et al. Influence of urea-formaldehyde resin modification with liquefied wood on particleboard properties // *Drvna industrija*. 2010. T. 61, № 1. C. 5–14.
7. Karimov O. H. et al. Development of chemistry and technology of lignin biopolymer // *Industrial production and use of elastomers*. 2020. № 1. Pp. 25–39.
8. Prasittisopin L., Li K. A new method of making particleboard with a formaldehyde-free soy-based adhesive // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. T. 41, № 10. C. 1447–1453.
9. Gross G. G. Biosynthesis of lignin and related monomers // *The Structure, Biosynthesis, and Degradation of Wood*. 1977. C. 141–184.
10. Sivasubramanian S., Schmidt D. F., Reynaud E. Novel bio-based thermoset resins from epoxidized vegetable oils for structural applications // 68th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers. 2010. C. 1673–1677.
11. Preechatiwong W., Yingprasert W., Kyokong B. Effects of phenol-formaldehyde/isocyanate hybrid adhesives on properties of oriented strand lumber (OSL) from rubberwood waste // *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2007. T. 29, № 5. C. 1367–1375.
12. Zarubina A. N. et al. Cellulose and nanocellulose. Review // *Forest Bulletin/Forestry bulletin*. 2019. Vol. 23, No. 5. Pp. 116–125.
13. Rakhimova B. U. et al. Nanocellulose: characterization, modification and biocompatibility // *Kazakhstan Science news*. 2019. № 4 (142). P. 72.
14. Amini E. et al. Utilization of cellulose nanofibrils as a binder for particleboard manufacture // *BioResources*. 2017. T. 12, № 2. C. 4093–4110.
15. The use of nanocellulose in the processes of gluing and modifying wood / V. A. Shamaev, N. S. Nikulina, S. A. Konstantinova et al. // *Vestnik MGUL – Lesnoy vestnik*. 2012. № 8(91). Pp. 107–110.
16. Gardner D., Tajvidi M. Hydrogen bonding in wood-based materials: an update // *Wood and Fiber Science*. 2016. T. 48, № 4. C. 234–244.
17. Ermolin V. N. et al. Water resistance of wood slabs obtained without the use of binders // *News of higher educational institutions. Forest Magazine*. 2020. № 3 (375). Pp. 151–158.
18. Oblivin A. N., Lopatnikov M. V. *Nanotechnologies and nanomaterials in the forest complex : monograph*. M. : MGUL, 2011. 221 p.
19. Puchkov B. V. *Grinding of raw materials for wood slabs* // Moscow : Lesn. prom-st, 1980. 117 p. 1980.
20. Alexandrova A. N., Solovieva T. V. *Intensification of defibratory chip grinding*. 2013.
21. Modlin B. D., Otlev I. A. *Production of particle boards*. M. : Higher school, 1977.
22. GOST 19222–84. Arbolite and its products. General technical conditions.
23. GOST R 54854–2011. Concretes are light on organic aggregates of plant origin. Technical conditions.
24. Ermolin V. N. et al. Development of a regime of hydrodynamic activation of wood particles in order to obtain plates without binders // *Coniferous boreal zones*. 2017. Vol. 35, No. 3-4. Pp. 79–83.
25. Demidov Yu. M. *Wood grinding for the production of particle boards* // *Forestry industry*. 1974. Pp. 100–105.
26. Gravelsins R. J. *Studies of grinding of wood and bark-wood mixtures with the Szego mill* : дис. 1999.
27. Voit V. B., Khusainov D. F. Properties of DStP from the point of view of the rheokinetics of carbamide-formaldehyde resin curing during its aging // *Technology of wood boards and plastics: interuniversity collection*. 1997. Pp. 76–83.
28. Metzger M. T. *Naturnahe Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis zur Herstellung von Holzwerkstoffen*. München: Technischen Universität München, 2007. 159 s.
29. Roffael E., Dix B., Schneider T. Zur Verwendung von Tanninen als Bindemittel in der Holzwerkstoffindustrie // *Tagungsband “Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen”*. Erfurt : WKI, 2001. S. 15–22.
30. Maltsev V. V. Technologies of detoxification of carbamide-formaldehyde resins (CFS) and wood-board materials based on them [Electronic resource] // *Abstracts of the report at the 12th International Forum “High Technologies of the XXI century”*. 2011. URL: <http://www.ecrushim.ru/articles/pg171.php> (accessed: 24.09.2017).
31. GOST 10632–2014. Chipboard slabs. Technical conditions. Introduction. 01.07.2015. Moscow : Standartinform, 2014. 16 p. (National Standard of the Russian Federation).

© Ермолин В. Н., Острякова В. А.,
Баяндин М. А., 2023

Поступила в редакцию 11.09.2023
Принята к печати 01.12.2023